



Diseño asistido por computadora del patrón de encendido en inversores de tensión, utilizando la técnica de control PWM

Elio Castro
Aldo E. Florencias
Mercedes Canasí
Joel Rosales

Septiembre del 2001

Resumen / Abstract

El artículo se relaciona con el desarrollo de un programa de ayuda para el diseño de los patrones de control de inversores de potencia tipo puente que utilizan técnicas PWM (Pulse Width Modulation). Este método de control bien establecido, permite incorporar todas las funciones del inversor, pero en lo fundamental garantizar la regulación de la tensión de salida manteniendo el factor de distorsión de armónicos lo suficientemente bajo (3-5 %) como para ser tolerado por los consumidores usuales. Obtener un adecuado diseño del patrón de tablas de búsqueda para su utilización en un inversor real empleando microcontrolador, es el problema fundamental a resolver. Los resultados del trabajo han sido comprobados con la ayuda de un procesador 8031.

Palabras claves: electrónica de potencia, inversores PWM, microcontroladores

This paper is related with a program which calculates the control pattern of single-phase power inverters using PWM techniques. This kind of control if it's well established makes possible to incorporate not all the inverter functions, but mainly the voltage regulation by keeping the total harmonics distortion as low as possible (3-5%); quite good for any consumer. The main problem to solve is to get a proper design of the tables search pattern to be used in a real single-phase inverter control using any processor. The experimental work has been done using the 8031 microcontroller.

Key words: power electronics, PWM inverters, microcontrollers

INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones se obtiene electricidad a partir de corriente directa para luego alimentar consumidores con una onda de tensión sinusoidal. Para realizar esta función, se requiere de un inversor de potencia tipo puente. En estos equipos pudiera considerarse como un requisito importante que el contenido de armónicos del voltaje de salida sea bajo (porcentaje de distorsión de armónicos THD).

Todas las exigencias del control de inversores pueden cumplimentarse a través del uso de las técnicas PWM (Pulse Width Modulation). Estas aplicaciones son difíciles de lograr con calidad y eficiencia.

El presente trabajo tiene como principal objetivo lograr una herramienta adecuada que permita abordar el diseño de los moduladores PWM sinusoidales para la etapa de desarrollo de semejantes aparatos en proyectos tecnológicos en el contexto nacional.

Se ha obtenido un programa llamado PWM 2000 que calcula los ángulos de conmutación de los semiconductores del inversor de potencia a partir de una serie de datos de entrada.

El programa ofrece como resultado los diferentes ángulos de conmutación y un análisis del contenido de armónicos (Fourier). Adicionalmente, permite elaborar un fichero de datos con formato hexadecimal que constituye una tabulación para almacenar en la memoria del sistema, con la carga de los temporizadores contadores necesaria para desarrollar luego la onda de tensión en tiempo real mediante la búsqueda secuencial de esos datos por un microcontrolador.

DESARROLLO

El programa PWM 2000 fue concebido para la determinación del patrón de conmutación de inversores monofásicos, por lo que básicamente se analiza la modulación sinusoidal, de muestreo natural o de muestreo regular ampliamente utilizadas en dichos inversores.

En la figura 1 se muestra el principio básico que se aplica para la obtención del patrón de modulación utilizando una forma de onda moduladora sinusoidal. En este caso se trata de una modulación natural en la que los puntos de conmutación se producen por la intersección normal de estas dos funciones.

Por otro lado, la modulación regular tiene como objetivo obtener aproximaciones que liberen de la tarea de solucionar complejas ecuaciones trascendentes que se derivan del caso anterior. Para este caso se asume que se trabaja con una forma de onda moduladora escalonada en la que el seno toma un valor constante para cada intervalo, como se aprecia en la figura 2.

Ambas técnicas se diversifican cuando se introducen para la modulación ondas de dos o de tres niveles, así como otras modificaciones a las aproximaciones que se practican para la implementación digital de la modulación regular. Este tema se recoge ampliamente en las referencias 1,2 y 3.

El estudio analítico de cada uno de los métodos allí referidos permite obtener las expresiones generalizadas mediante las cuales es posible calcular todos los intervalos de tiempos o ángulos de disparo de los transistores del inversor atendiendo a las consideraciones a continuación enumeradas

1. El método de modulación seleccionado.
2. La cantidad de pulsos pares o impares a generar en medio ciclo.
3. El tipo de onda que se sintetiza lo que modifica sustancialmente la forma de disparo del puente inversor.
4. El índice de modulación preestablecido.

A continuación estas se resumen para cada caso:

Para muestreo regular simétrico en una onda de dos niveles:

$$t_{p_k} = MT_c \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi(k-1)}{R_c} \right] \quad \dots(1)$$

Para muestreo regular simétrico en una onda de tres niveles:

$$t_{p_k} = \frac{T_c}{2} \left[1 + M \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi(k-1)}{R_c} \right) \right] \quad \dots(2)$$

Para muestreo regular asimétrico en una onda de dos niveles:

$$t_{p_k} = \frac{T_c}{2} \left[1 + \frac{M}{2} \left(\operatorname{sen} \left(\frac{2\pi(k-1)}{R_c} \right) + \operatorname{sen} \left(\frac{\pi(2k-1)}{R_c} \right) \right) \right] \quad \dots(3)$$

Para muestreo regular simétrico en una onda de tres niveles:

$$t_{p_k} = \frac{MT_c}{2} \left[\operatorname{sen} \left(\frac{\pi(2k-1)}{R_c} \right) + \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi(k-1)}{R_c} \right) \right] \quad \dots(4)$$

Para muestreo regular simétrico modificado en una onda de dos niveles:

$$t_{p_k} = \frac{T_c}{2} \left[1 + M \operatorname{sen} \left(\frac{\pi(2k-1)}{R_c} \right) \right] \quad \dots(5)$$

Para muestreo regular simétrico modificado en una onda de tres niveles:

$$t_{p_k} = MT_c \operatorname{sen} \left[\frac{\pi(2k-1)}{R_c} \right] \quad \dots(6)$$

Para muestreo regular asimétrico modificado en una onda de dos niveles:

$$t_{p_k} = \frac{T_c}{2} \left\{ 1 + \frac{M}{2} \left[\sin \frac{2\pi k}{R_c} + 2\sin \left(\frac{\pi(2k-1)}{R_c} \right) + \sin \left(\frac{2\pi(k-1)}{R} \right) \right] \right\} \quad \dots(7)$$

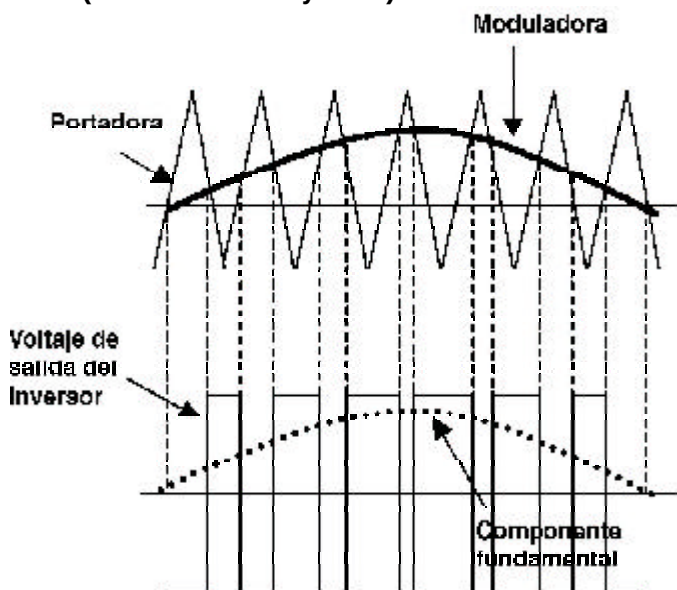
Para muestreo regular asimétrico modificado en una onda de tres niveles:

$$t_{p_k} = \frac{MT_c}{4} \left\{ \sin \left(\frac{2\pi k}{R_c} \right) + 2\sin \left(\frac{\pi(2k-1)}{R_c} \right) + \sin \left(\frac{2\pi(k-1)}{R_c} \right) \right\} \quad \dots(8)$$

Se ha desarrollado un algoritmo para el cálculo de los ángulos de conmutación partiendo del índice de modulación y la razón de la portadora. Todo esto puede apreciarse en la figuras 3 que muestra la pantalla principal del programa.

En la pantalla de la figura 4 se puede observar la entrada de datos al programa (razón de la portadora e índice de modulación).

En la figura 5 se muestran los resultados de la corrida del programa en cuanto a los ángulos de conmutación (flancos de subida y caída).



1

Del patrón de ángulos de conmutación obtenidos, el programa realiza un análisis de Fourier de la onda resultante y además calcula la distorsión armónica total, tal y como puede apreciarse en la figura 6.

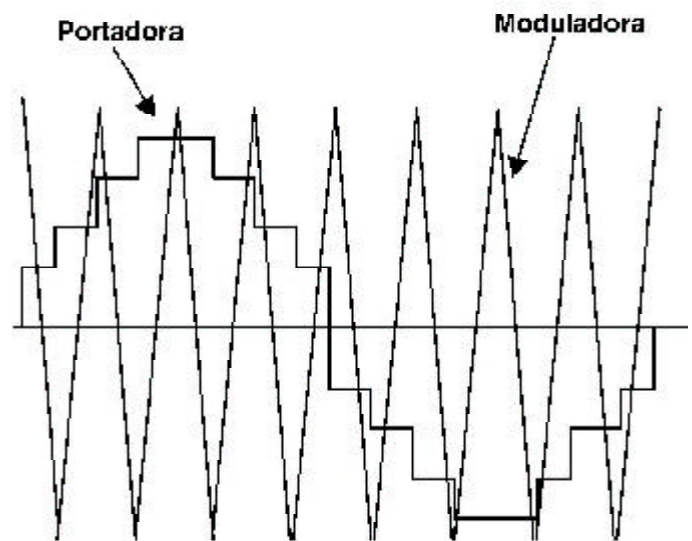
Además, se representa en otra pantalla del programa el diagrama de barras de amplitud de los armónicos predominantes en el espectro de frecuencia de la onda de salida (figura 7).

Asimismo, en la figura 8 se puede observar la información gráfica de los pulsos para un semiperíodo del patrón de conmutación del inversor.

Como se puede apreciar en la figura 9, el programa permite elaborar un fichero de datos con formato hexadecimal que constituye una tabulación para almacenar en la memoria del sistema, con la carga de los temporizadores/contadores necesaria para desarrollar luego la onda de tensión en tiempo real mediante la búsqueda secuencial de esos datos.

El procesador empleado para comprobar los resultados es un microcontrolador 8051 de 8 bits, el que cuenta además con otras prestaciones como dos temporizadores programables de 16 bits, cinco fuentes de interrupción, puertos externos, etcétera.

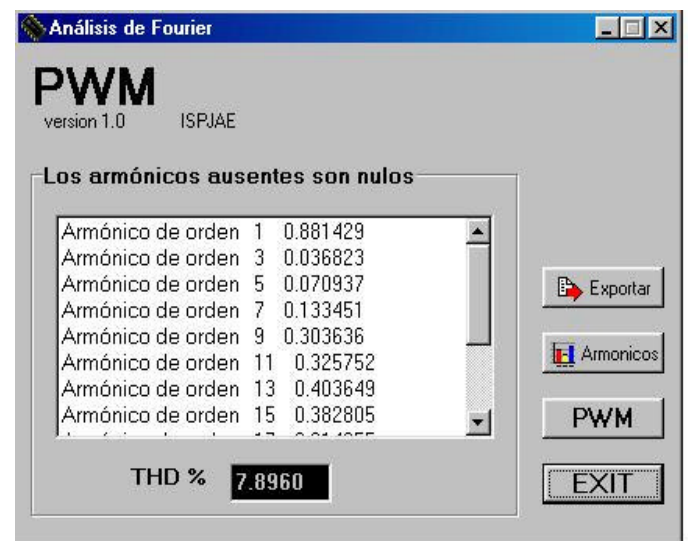
Esta CPU utilizada es el sistema fénix de MPR venezolana, unido a un módulo de adquisición de datos, sirve de soporte como mando del inversor. Este dispone de un enlace serie por rs232 que permite bajar los programas del PC y ejecutarlos.



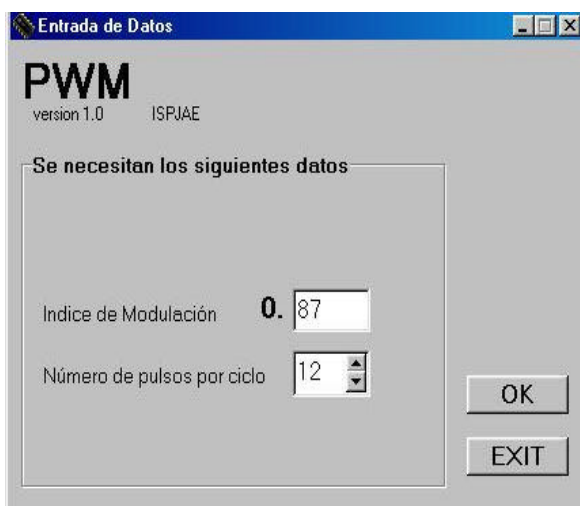
2



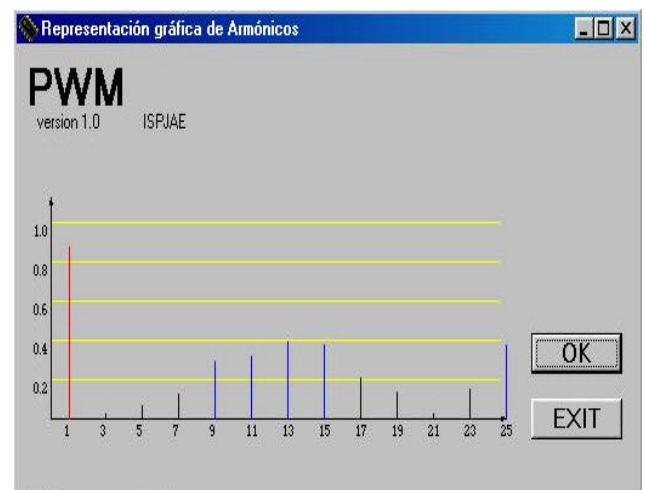
3



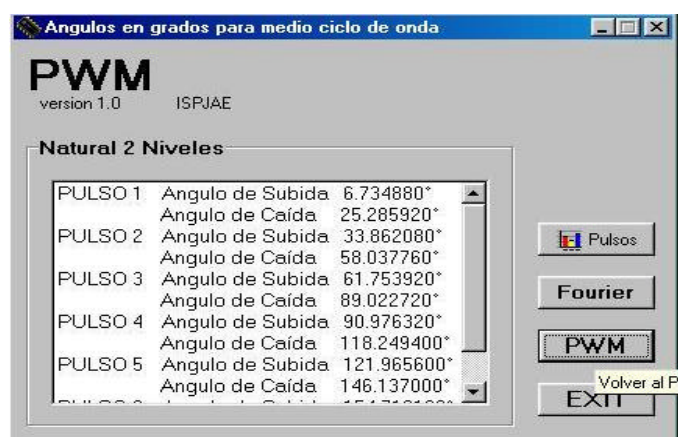
6



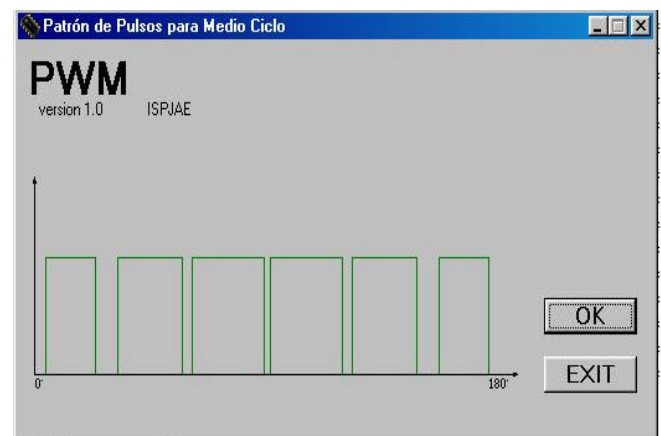
4



7



5



8



9

El prototipo desarrollado es un convertidor monofásico de 500 W que opera a 60 Hz y que puede ser controlado con distintas estrategias PWM; capaz de operar con una onda de salida sinusoidal de bajo porcentaje de distorsión. El modulador hace uso de módulos IGBT de potencia, y circuitos integrados excitadores IR2155.

La realización de las funciones del control se ha obtenido con el empleo de este microcontrolador. Con este mismo se le realiza adicionalmente la tarea de medición, señalización y control así como la atención a la tarea principal del modulador accediendo a las tablas de búsquedas almacenadas en memoria.

El trabajo en tiempo real de la instalación se consigue haciendo uso del sistema de interrupciones del dispositivo.

Con este sistema ha sido posible ensayar diversas estrategias de modulación y experimentar instalaciones de electrónica de potencia aplicadas a paneles FV.

Programa de Control

La alternativa experimental del modulador PWM diseñado por los métodos anteriores puede ser la de almacenar patrones en tablas de búsqueda que luego son encuestadas en tiempo real por el microcontrolador. Con ayuda de estas se puede controlar en tiempo la combinación de transistores adecuada según la estrategia del programa y el ancho de pulso deseado.

Una de las opciones del programa visto anteriormente y que sirve de ayuda a este fin, es que si se desea, se crea un fichero donde guarda la información

necesaria para luego poder elaborar las tablas de búsquedas durante el desarrollo del programa en ensamblador para el procesador en cuestión. En este trabajo se va a emplear un microcontrolador de 8 bits de la familia MCS 51.

El programa de control desarrollado para ensayar la aplicación se fundamenta en el empleo de una interrupción utilizando como fuente un temporizador interno para disponer de una forma de realización del intervalo de tiempo correspondiente al pulso que se genera dentro del semiciclo dado.

Para poder realizar esta tarea será necesario además conocer en cada momento la combinación de los transistores apropiada en cada uno de esos intervalos.

La información que ofrece el programa analítico en el fichero mencionado, es la que permite organizar todos estos elementos en una tabla que se incorpora como parte del programa fuente del sistema.

Para ser accesada secuencialmente, se toman en la tabla intervalos de 3 bytes organizados de la forma siguiente:

En los primeros se dispone de los valores de carga del temporizador (para ser operado en modo 1 de 16 bits dividido en byte alto y byte bajo respectivamente, y que representan un tiempo equivalente a la duración del pulso). En el byte siguiente, se almacena un código equivalente a la combinación de señales necesarias para encender o apagar los transistores del convertidor conectados a través de su excitador aislado a un puerto del microcontrolador.

A partir de esta información es posible elaborar un programa que durante su ejecución gobierne el encendido y apagado de los semiconductores de potencia, válido para cualquiera de los métodos posibles a emplear en la modulación.

El programa de control en cuestión se estructura en dos bloques, programa principal y una rutina de interrupción del temporizador.

En el programa principal se realizan las siguientes operaciones:

- Se declaran las variables datos y banderas.
- Se bloquea la operación de los transistores para evitar falsos disparos.
- Se declaran los modos de trabajo de los puertos y dispositivos.

- Se definen los modos de interrupción.
- Se carga el valor de conteo inicial del temporizador y se arranca.
- Se habilitan las interrupciones y desde un lazo de espera el microcontrolador saltará a la rutina de servicio cuando la interrupción actúa.

Con cada solicitud de interrupción de forma consecutiva se pasará a la rutina correspondiente en la que se desarrollan las siguientes tareas:

- Utilizando un puntero se accesa la tabla de búsqueda y se almacena en el *timer* el valor correspondiente al intervalo de tiempo siguiente.
- Se busca además y se envía la señal de disparo por el puerto.
- Antes de devolver el control al programa principal más exactamente al lazo de espera, se verifica entonces si se ha llegado al final de la tabla. En este caso se coloca en la posición de inicio el puntero.

Para el desarrollo de esta idea se ha empleado el sistema de desarrollo Fénix-51 que se describe a continuación junto con el hardware de la instalación.

Sistema de Desarrollo Fénix 51

El elemento fundamental del mismo lo constituye el microcontrolador 8031. El concepto de este sistema es la facilidad de disponer de un hardware flexible y potente conectado al PC vía rs232 con la finalidad de bajar los programas en código hexadecimal de la aplicación hacia la RAM de este sistema pequeño y así poder rápidamente depurar y ensayar este.⁴

La configuración general del mismo se resume en lo siguiente:

- Microcontrolador 8031 de 8 bits.
- Memoria RAM modelo 6264 8K y ROM 27256 32K, ambas con posibilidades expansión.
- Unidades de entrada y salida, puertos programables 8255.

La operación básica de esta unidad está soportada por un programa residente en su ROM facilitado por el fabricante y que actúa como monitor permitiendo controlar por comandos desde el PC enlazada el trabajo de este sistema, examinar elementos de su arquitectura y los registros internos así como la carga de los códigos del programa vía rs232 serie en su RAM, y ejecutar luego desde allí los programas de la aplicación que se desarrollan.

Este sistema puede ser expandido para soportar un número determinado de entrada y salidas analógicas necesarias en la mayoría de las aplicaciones para realimentar variables hacia el control digital mediante el muestreo periódico de las mismas, así como la

señal de referencia del sistema. Para esto se utiliza un módulo de 8 entradas analógicas multiplexadas de 8 bits disponibles en la tarjeta convertidor 2000 de Alecoop basados en el conversor AD00808.

El sistema se completa con un módulo de potencia que se describe a continuación.

Módulo de potencia del convertidor PWM
Está formado por tres canales de operación independiente y cada canal presenta:

- Acoplador óptico que se encarga de aislar ópticamente los circuitos de control y fuerza. El acoplador que se emplea es del tipo 4N26. En la figura 11 se muestra la configuración diseñada.

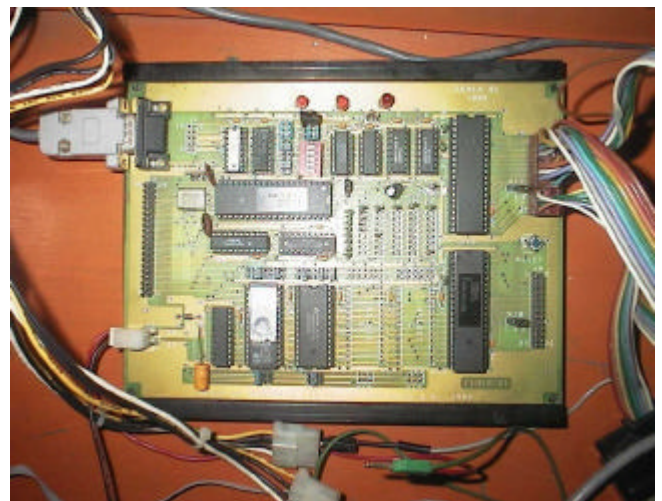
- Excitador IR2155

Para la instalación modular se emplea el excitador IR 2155, el cual logra una señal de salida óptima para los requerimientos de excitación que exige el bloque de IGBT anteriormente utilizado. Presenta dos salidas con la característica de que una es la negación de la otra, por eso se concibe que el diseño de cada salida esté conectada al *gate* de cada IGBT que forma una misma rama del puente trifásico. A continuación se presenta algunas de las características del IR2155:

- Excitación de dos elementos.
- Una sola fuente de alimentación.
- Conexión directa al circuito de fuerza.
- Robustez y simplicidad en el montaje.
- Muy flexible, confiable y compacto.

El diagrama interno del circuito integrado se puede observar en la figura 12.

El excitador IR 2155, como se observa en la figura 12, presenta una configuración interna que le permite trabajar de modo autooscilante, en este caso no se hace uso de esta característica, ya que se pretende



subordinar el excitador a la señal de control que envía el microcontrolador. La figura 13 muestra el esquema de conexión externo al excitador.

Debido a este diseño del bloque de potencia con emisor flotante, se necesita primeramente desplazar de nivel al emisor en flotación para lograr así 15 V de excitación en Q1 y además este emisor que estará sometido a tensiones de 600 V debe ser desacoplado artificialmente del excitador. El primer problema se resuelve con la acción del capacitor de 10uF, este se carga cuando conduce el IGBT2. Además, cuando Q2 conmuta aparece en el emisor flotante un voltaje que puede ser hasta de 600 V y el diodo, que debe ser de rápida recuperación, bloquea este voltaje protegiendo así al excitador de esta sobretensión.

- Red de impedancia de excitación

Se persigue con este diseño que la resistencia de apagado sea menor que la de encendido y así se evita el encendido no deseado. A cada salida del excitador está conectada una red de excitación como se muestra en la figura 14.

- Bloque de potencia

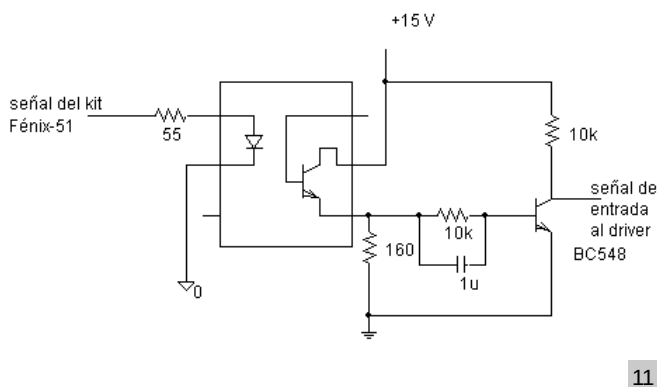
El bloque de potencia empleado es del tipo CPV364MF, este es un inversor trifásico fabricado por la Compañía Internacional Rectifier, cuenta con una frecuencia típica de trabajo de 5kHz, admite hasta 600 V de CD y 12 A por rama.⁵

RESULTADOS EXPERIMENTALES

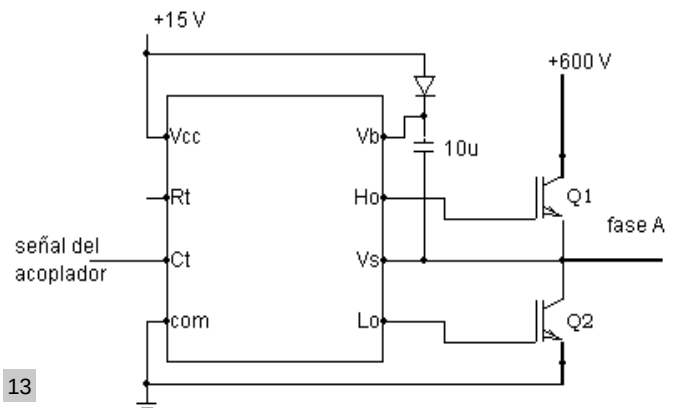
La efectividad del método de diseño del modulador PWM ha sido demostrada partiendo del desarrollo de una aplicación soportada con la instalación descrita anteriormente.

En especial se ha prestado interés a la modulación sinusoidal en tres niveles. El caso estudiado en particular parte de una razón de la portadora de 10 pulsos por medio ciclo.

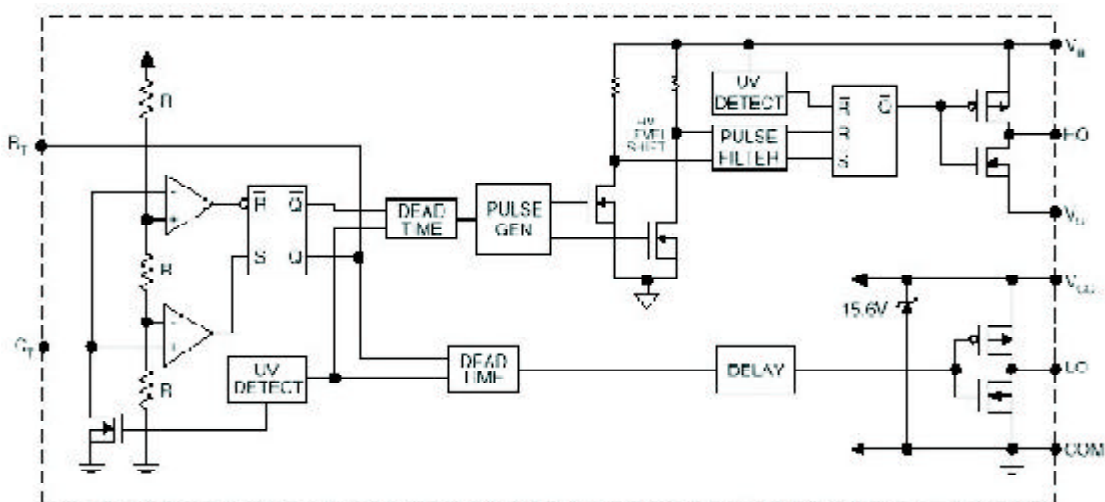
La instalación del experimento se muestra en la figura 15 y las formas de onda así obtenidas se muestran en la figura 16.



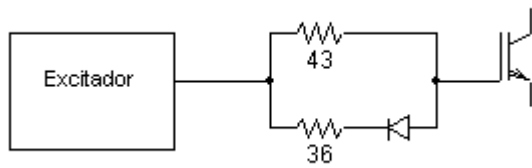
11



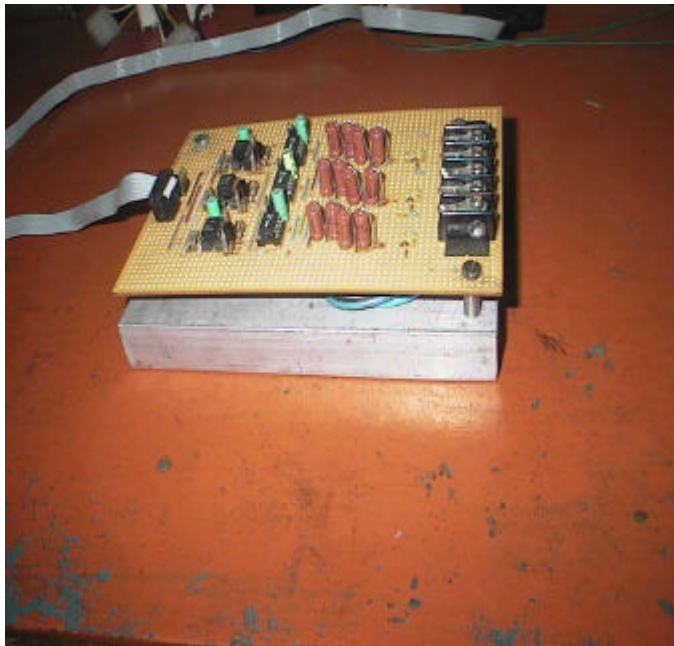
13



12



14



15



16

CONCLUSIONES

El análisis de la forma de onda de la tensión en la carga permite asegurar que dicha onda se corresponde perfectamente con el patrón de ángulos de conmutación obtenidos por el programa PWM2000. Esto significa que los patrones de control que son calculados con dicho programa para el ensayo de las estrategias de modulación analizadas por el mismo son válidos. Este resultado es de particular interés para su utilización en los laboratorios de Electrónica de Potencia de la carrera de Ingeniería Eléctrica, donde se estudia esta temática, además de microprocesadores, donde se abordan las aplicaciones del control digital de convertidores.

REFERENCIAS

1. Acharya G., N.; S. Shakhawat S. and W. Shepherd: "Microprocessor-Based PWM Using Modified Regular Sampling Techniques", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-32, No. 2, March/April, 1986.
2. Castro Alfonso, Elio: "Diseño y simulación de inversor monofásico con salida sinusoidal", Tesis de Maestría, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1998.
3. Hernández Noélvis y Orestes Hernández: "Diseño y pruebas a un inversor monofásico controlado con 8051", Trabajo de Diploma, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1997.
4. *Manual de explotación FÉNIX-51*, 1992.
5. *IGBT Designer's Manual*, IR, 1994.

AUTORES

Elio Castro Alfonso

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica,
Asistente, Centro de Investigaciones y Pruebas
Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior
Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE)
e-mail:eca@cipel.ispjae.edu.cu

Aldo E. Florencias Puerto

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica,
Asistente, CIPEL, ISPJAE
e-mail:afp@cipel.ispjae.edu.cu

Mercedes Canasí Piñeiro

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica,
Asistente, CIPEL, ISPJAE
e-mail:mcanasi@cipel.ispjae.edu.cu

Joel Rosales Hernández

Ingeniero Electricista, Profesor Adiestrado
e-mail:joelraul@cipel.ispjae.edu.cu